

Telaah Produksi Biodiesel dari Biomassa Mikroalga (Perbandingan Energi dan Nilai Keuntungan Lingkungan)

A Study on Biodiesel Production from Microalgae Biomass (Comparison of Energy Budget and Environmental Cost Value)

ARIF DWI SANTOSO

Peneliti Pusat Teknologi Lingkungan, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Gedung 820 Geostech, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Provinsi Banten, 15314 INDONESIA
arif.dwi@bppt.go.id

ABSTRACT

The Center for Environmental Technology-BPPT has trial-tested the cultivation of microalgae in a photo bioreactor in order to determine the productivity of the cell and the efficiency of the absorption of greenhouse gases as well as to test up its potential as a biofuel feedstock. This study calculated the energy balance of the overall process then compared it with the absorption value of carbon gas. Energy equilibrium value was calculated using the method of Life Cycle Assessment (LCA) method, while carbon sequestration capability was measured directly from the test reactor. The results showed that the variable identification using LCA application can provide a detailed description of the inventory with the input and output of the production process. The largest energy process used in the production process occurred in the harvesting activities amounting to 55.6 MJ and in the sonication process amounting to 35 MJ. Net Energy Ratio (NER) value calculation for the production of microalgae biodiesel was found to be 0.62 ± 0.78 . Total cost and total revenue of the production of microalgae biodiesel were Rp. 62 980 and Rp. 42.900, respectively,-.

Key words: *algae photobioreactor, energy balance, NER, LCA, carbon emission.*

ABSTRAK

Pusat Teknologi Lingkungan-BPPT telah melakukan ujicoba budidaya mikroalga dalam fotobioreaktor untuk mengetahui produktivitas sel dan efisiensi penyerapan gas rumah kaca serta ujicoba potensinya sebagai bahan baku biofuel. Pada penelitian ini telah menghitung kesetimbangan energi dari keseluruhan proses budidaya alga untuk kemudian membandingkan hasilnya dengan nilai kapabilitas penyerapan gas karbon dari proses tersebut. Nilai kesetimbangan energi dihitung dengan menggunakan metode perhitungan Life Cycle Assessment (LCA), sedangkan nilai kapabilitas penyerapan gas karbon diukur langsung dari reaktor ujicoba. Nilai kapabilitas penyerapan karbon kemudian dibandingkan dengan nilai penggantian biaya dari emisi karbon yang diacu oleh beberapa negara yang telah menerapkan satuan biaya penggantian penyerapan emisi karbon. Hasil perhitungan menyatakan bahwa penelusuran variabel dengan menggunakan aplikasi LCA dapat memberi gambaran dengan rinci tentang inventarisasi masukan dan keluaran proses produksi. Energi terbesar yang digunakan pada proses produksi terjadi pada tahap budidaya yakni pada kegiatan pemanenan sebesar 55,6 MJ dan proses pemecahan dinding sel sebesar 35 MJ. Nilai hasil perhitungan Net Energy Ratio (NER) pada produksi biodiesel mikroalga adalah $0,62 \pm 0,78$. Total biaya dan total pendapatan dari proses produksi biodiesel dari mikroalga masing-masing sebesar Rp. 62.980,- dan Rp. 42.900,-.

Kata kunci : alga fotobioreaktor, kesetimbangan energi, NER, LCA, emisi karbon

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Banyak kalangan memprediksi Indonesia akan mengalami krisis energi nasional di masa mendatang. Krisis energi ini dipicu oleh ketergantungan yang tinggi pada sumber energi fosil, sementara produksi energi terbarukan belum dapat membantu pasokan kebutuhan energi yang terus meningkat. Kondisi keterpurukan energi diperparah dengan gaya hidup masyarakat Indonesia yang belum mendukung upaya keberlanjutan energi nasional.

Dalam kurun waktu 30 tahun antara 1980-2010 dan bahkan hingga sekarang, hampir 90% energi yang digunakan dalam pembangunan di Indonesia masih mengandalkan dari 3 sumber energi fosil utama (batu bara, minyak bumi, dan gas alam)⁽¹⁾. Sementara energi non-fosil (angin, panas bumi, sinar matahari, dan lain-lain) tidak mengalami perkembangan yang berarti. Kondisi ketidakseimbangan penggunaan energi ini akan tetap berlanjut bila memperhatikan gaya hidup masyarakat dalam penggunaan energi masih jauh dari pola hidup hemat energi⁽²⁾.

Salah satu upaya mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil adalah dengan mencari alternatif sumber energi yang terbaharukan. Sumber energi ini diharapkan dapat melepaskan ketergantungan pada kebiasaan mengkonsumsi bahan bakar fosil. Generasi inovasi pertama dalam pencarian alternatif bahan bakar bukan fosil menjadi biofuel adalah pencapaian produksi biofuel dari minyak sawit, jagung, jarak dan tanaman pangan lainnya⁽³⁾.

Keberhasilan awal ini ternyata melahirkan perdebatan di kalangan peneliti dan pemerhati lingkungan karena kontribusi produksi biofuel ini justru menambah emisi gas rumah kaca akibat dari perubahan penggunaan lahan^(3,4). Selain itu, banyak peneliti menyimpulkan bahwa konversi tanaman pangan seperti minyak sawit, jagung, dan jarak menjadi biofuel merupakan kegiatan yang tidak berkelanjutan, karena kegiatan ini tidak hanya akan mengancam pasokan pangan, tetapi juga akan menaikkan kerusakan hutan dan keanekaragaman hayati⁽⁵⁾.

Biomasa dari mikroalga dianggap mampu menjadi prioritas utama sebagai salah satu kandidat bahan baku biodiesel karena biomasa mikroalga merupakan bahan baku energi yang dapat diperbarui serta secara alami mempunyai kapasitas dalam pengurangan emisi gas CO₂⁽⁶⁾. Lebih dari pada itu, mikroalga tidak menjadi pesaing terhadap pasokan pangan seperti halnya kelapa sawit dan tanaman darat lainnya, serta bersifat non-destruktif sehingga bisa dikatakan tanpa menimbulkan dampak lingkungan atau sangat ramah lingkungan.

Mikroalga memanfaatkan sinar matahari untuk merubah CO₂ menjadi biomasa dengan produktivitas yang jauh lebih efisien dibanding dengan tanaman darat⁽⁷⁾. Keuntungan lain dari mikroalga yaitu memiliki *double time* (kelipatan dua) pertumbuhan sekitar 3,5 jam dan memerlukan sedikit air dalam pertumbuhannya serta mampu menghasilkan bahan baku biofuel 15-300 kali lebih cepat dibanding dengan tanaman darat⁽⁸⁾.

Tingginya produktivitas mikroalga untuk menjadi sumber bahan biofuel yang ekonomis dan ramah lingkungan telah menarik perhatian kalangan para pebisnis dan peneliti. Penelitian dalam skala laboratorium dan skala *pilot project* tentang pemanfaatan mikroalga sebagai bahan baku biofuel telah banyak dilakukan di beberapa Negara belahan dunia.

Penelitian ini akan menghitung kesetimbangan energi dari proses produksi biodiesel dari biomassa mikroalga. Hasil yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan nilai penyerapan gas emisi karbon selama proses produksi tersebut. Nilai kapabilitas penyerapan emisi karbon didekati dengan perhitungan nilai pengantian biaya dari emisi karbon yang diacu oleh beberapa negara yang telah menerapkan perhitungan serupa. Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat memberikan informasi tentang kelayakan ekonomi dan lingkungan dari biomassa mikroalga.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kesetimbangan energi dari proses produksi biodiesel dari biomassa mikroalga yang dibudidayakan dalam fotobioreaktor. Selain itu juga untuk menghitung kemampuan sistem fotobioreaktor tersebut dalam penyerapan emisi gas rumah kaca. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi dan bahan rujukan tentang potensi alga dalam proses mitigasi gas rumah kaca di Indonesia.

2. BAHAN DAN METODE

Metode penelitian dimulai dengan melakukan *review literature*. Penggalan literatur meliputi topik identifikasi variabel budidaya alga dalam fotobioreaktor, proses produksi biodiesel, konstruksi metode perhitungan energi, nilai NER dan kapabilitas penyerapan karbon, serta analisis dan interpretasi data. Pengolahan dan intepertasi data dilakukan secara manual dengan *MS-Excel* dan *software* perhitungan LCA *Eu-peco*. Percobaan ujicoba lapangan yang dilakukan adalah kegiatan budidaya biomassa mikroalga dan analisa labolatorium. Kegiatan ini

dimaksudkan untuk memvalidasi dan melengkapi data sekunder yang didapat.

Kegiatan ujicoba operasional FBR dilaksanakan di halaman gedung 820 Geostek Pusat Teknologi Lingkungan di kawasan Puspiptek Serpong. Pelaksanaan penelitian dilakukan selama 3 bulan dimulai bulan Oktober hingga Desember 2014.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Variabel Produksi *Biodiesel* dari Biomassa Mikroalga

Variabel yang digunakan pada perhitungan LCA produksi biomassa mikroalga ditelaah dari makalah Jorquera *et al.*⁽⁶⁾, Stephenson *et al.*⁽⁹⁾, Murphy⁽¹⁰⁾, dan Khoo *et al.*⁽¹¹⁾ Pola perhitungannya adalah dengan menghitung semua masukan (*input*) material mulai dari pembuatan wadah (kolam kultur/FBR), kegiatan transportasi, kegiatan budidaya, panen, kegiatan produksi minyak alga dan *biodiesel*. Variabel-variabel yang digunakan seperti tergambar pada Gambar 1

Dari gambaran skema inventarisasi *input*, *output* pada proses produksi *biodiesel* di atas memperlihatkan bahwa variabel yang diperlukan dalam perhitungan LCA meliputi semua *input* berupa bahan material dan energi, serta semua *output* berupa produk, dan hasil samping serta limbah yang dihasilkan.

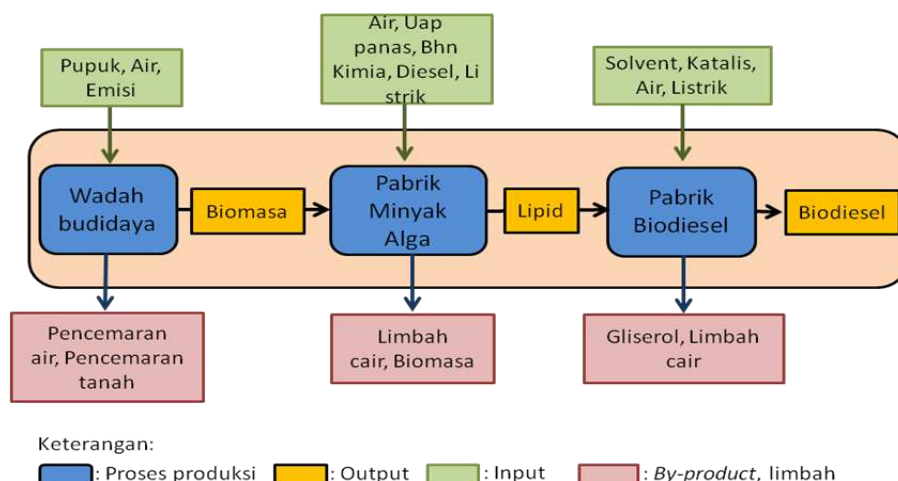
Pada beberapa kasus, limbah yang dihasilkan pada suatu tahapan produksi *biodiesel* seperti katalis yang digunakan seperti metanol dan natrium hidroksida, digunakan kembali sebagai *input* produksi *biodiesel* berikutnya. Pemakaian limbah sebagai *input* produksi ini selain akan menekan biaya produksi juga akan mengurangi dampak limbah ke lingkungan.

Berdasarkan variabel yang telah ditetapkan, kemudian dihitung nilai-nilainya yang didapat dari data skala komersial yang disederhanakan dalam unit fungsional 1 liter *biodiesel* (Tabel 1).

Tabel 1. Input bahan, energi untuk memproduksi 1 liter *biodiesel* mikroalga

Input bahan, energi	Satuan	Jumlah
A. Budidaya		
KNO ₃	kg	0,34
P ₂ O ₅	kg	0,18
Energi listrik	MJ	55,60
B. Produksi minyak alga		
Energi listrik	MJ	35,70
Transportasi	Tkm*	0,05
C. Produksi <i>biodiesel</i>		
Metanol	kg	0,21
NaOH	kg	0,01
Energi panas	MJ	2,06
Energi listrik	MJ	2,96
Transportasi	tkm	0,05

* : 1 tkm (1 ton-Km) adalah upaya memindahkan beban barang sebanyak 1 ton sejauh 1 Km.



Gambar 1. Variabel *input*, *output* dan produk pada proses produksi *biodiesel* dari biomassa mikroalga

Pada sub produksi budidaya biomassa mikroalga, variabel *input* dan *output* yang dominan adalah penggunaan pupuk dan listrik. Pupuk yang digunakan adalah jenis KNO_3 dan P_2O_5 dengan konsentrasi sebanyak 20-50 ppm. Sedangkan listrik pada subproduksi ini digunakan untuk menghidupkan pompa air selama proses budidaya dan untuk keperluan pemanenan biomassa. Selama masa pertumbuhan, secara berkala pompa air dihidupkan untuk menjaga agar mikroalga tidak mengendap dan menjaga kondisi media tumbuh alga selalu homogen. Dengan kondisi ini maka distribusi nutrisi, cahaya dan gas-gas yang diperlukan untuk pertumbuhan alga menjadi terjamin merata^(6,11).

Penggunaan energi listrik yang besar adalah pada proses pemanenan alga. Pada proses ini, alga disaring dengan filter dengan ukuran 5-10 μm dengan bantuan tekanan pompa. Kedua proses *bubbling* media dan pemanenan alga tersebut memerlukan energi sebesar 55,6 MJ/1 l *biodiesel* yang dihasilkan. Beberapa peneliti mengklaim bahwa biaya pemanenan mikroalga yang berupa energi berkisar 30-55% dari keseluruhan biaya produksi *biodiesel*^(5,7,10). Pada akhir proses, dihasilkan limbah berupa air sekitar 0,35 m^3 . Air limbah ini berpotensi menimbulkan pencemaran tanah karena mengandung sisa-sisa pupuk dan biomassa yang tidak tersaring. Pada beberapa kasus, air limbah ini dimanfaatkan kembali sebagai media tumbuh sehingga dapat menghemat penggunaan bahan baku air sekaligus mengurangi terjadinya pencemaran.

Pada subproduksi minyak alga, variabel *input* energi adalah 35,7 MJ. Energi ini sebagian besar dipakai pada proses sonikasi, yakni proses pemecahan dinding sel mikroalga sebelum diproses transesterifikasi.

Pada subproduksi *biodiesel*, *input* dominan berasal dari penggunaan bahan kimia yang berupa metanol dan NaOH, listrik 2,96 MJ, dan uap panas 2,06 MJ. Penggunaan metanol relatif besar yakni sebesar 0,21 kg dikarenakan tingginya residu yang harus dipisahkan dari lipid. Beberapa peneliti terkait alasan biaya dan perlindungan lingkungan mengganti bahan methanol dengan bio etanol. Upaya ini masih diperdebatkan, karena keefektifan bioetanol masih relatif rendah sehingga mengurangi produk *biodiesel* yang dihasilkan⁽¹²⁾.

4 Perhitungan Energi pada Produksi *Biodiesel* Mikroalga

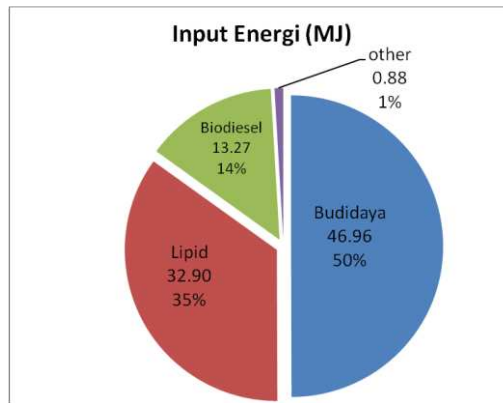
Data hasil perhitungan total energi pada produksi 1 liter *biodiesel* mikroalga ditampilkan dalam pie diagram pada Gambar 2. Pada tahap budidaya, energi untuk produksi *biodiesel* dari biomassa banyak digunakan pada proses

budidaya dan proses pemanenan yang mencapai 46,96 MJ per produksi 1 (satu) liter *biodiesel*. Energi yang besar juga diperlukan untuk proses pemecahan dinding sel sekitar 32,9 MJ pada proses produksi minyak alga. Sementara energi yang diperlukan selama proses pemrosesan menjadi *biodiesel* membutuhkan energi sebesar 13,27 MJ.

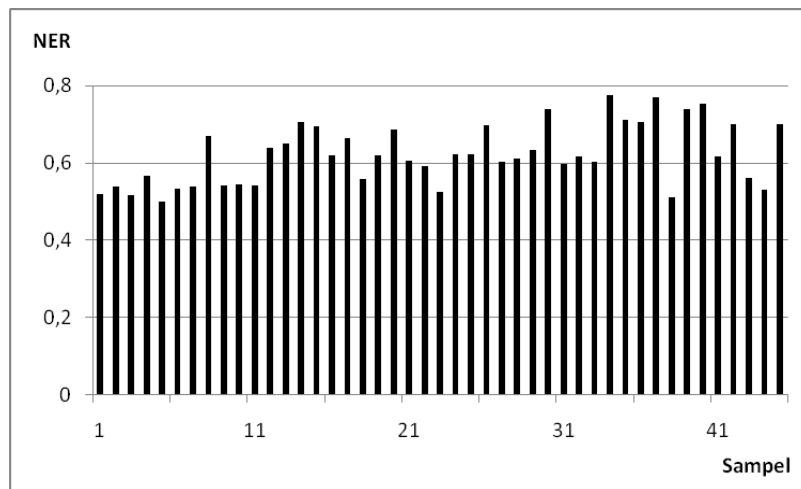
Dari hasil perhitungan energi pada proses produksi *biodiesel* mikroalga di atas, beberapa hal yang dapat diambil kesimpulan adalah komponen energi terbesar pada produksi *biodiesel* mikroalga terserap pada tahap pengadaan/produksi biomassa (CPO/minyak alga) yang mencapai 50%.

Informasi ini memberi perhatian kepada pemerhati *biodiesel mikroalga*, bahwa untuk menekan penggunaan energi pada produksi *biodiesel* mikroalga harus memperhatikan tahapan budidaya ini. Penghematan energi dapat dilakukan dengan cara mengefisienkan proses persiapan lahan, dan operasional budidaya, sehingga akan dapat menekan keseluruhan biaya produksi *biodiesel*. Selain tahap budidaya, pada tahap produksi minyak alga juga memerlukan energi yang besar yaitu sekitar 32,9 MJ atau sekitar 35% dari total energi yang dibutuhkan. Energi pada tahap ini banyak diserap pada kegiatan pemanenan dan proses pemecahan dinding sel mikroalga.

Untuk mengetahui perbandingan energi yang dihasilkan dengan energi yang dibutuhkan pada proses produksi *biodiesel*, maka dilakukan perhitungan NER. Data yang digunakan dalam proses ini menggunakan sampel dari data sekunder, dengan merujuk pada data percobaan yang dilakukan. Perhitungan NER ini menggunakan acuan pembandingan energi dari Khoo et al.,⁽¹¹⁾ yang menyatakan bahwa setiap 1 liter *biodiesel* energi yang dihasilkan menghasilkan energi sekitar 44,20 MJ. Keragaan nilai NER dari 45 sampel ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Komposisi energi yang diperlukan pada produksi *biodiesel* mikroalga



Gambar 3. Hasil perhitungan NER pada produksi *biodiesel* dari mikroalga

Nilai hasil perhitungan NER pada produksi *biodiesel* mikroalga adalah $0,62 \pm 0,78$. Kisaran nilai NER ini kesetimbangan energi yang negatif, artinya bahwa setiap produksi biodiesel yang menghasilkan energi sebesar 0,62 MJ akan memerlukan energi input sebesar 1 MJ.

4.1 Analisis Finansial dan Lingkungan

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui berapa total dari manfaat dan biaya dari produksi *biodiesel* mikroalga. Manfaat yang dihitung adalah keseluruhan produk dan jasa/manfaat lingkungan yang dihasilkan selama produksi *biodiesel*. Hasil inventarisasi manfaat/jasa ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 merupakan rangkuman hasil perhitungan produk dan biaya pada produksi *biodiesel* dari mikroalga. Produk utama yang meningkatkan nilai tambah adalah kontribusi proses produksi dalam menyerap emisi gas CO₂ yang dinilai sebesar Rp. 11.700,- dan kontribusi dalam menyuplai gas oksigen ke lingkungan sebesar Rp.12.500,-.

Produk lain yang berupa barang real antara lain berupa biodiesel mikroalga (Rp. 9.800,-), serat biomassa (Rp. 2.200) dan gliserol (Rp. 6.700,-). Total pendapatan dari proses produksi *biodiesel* dari mikroalga sebesar Rp. 42.900,-.

Sedangkan biaya dominan yang dikeluarkan pada proses ini meliputi peruntukan untuk kebutuhan listrik. Total kebutuhan listrik selama proses adalah sekitar 100 MJ atau setara dengan Rp.60.000,-, sedangkan kebutuhan lainnya meskipun kontribusinya kecil, tapi turut juga menambah biaya adalah penggunaan bahan kimia dan transportasi. Total biaya yang diperlukan selama proses berlangsung sebesar Rp. 62.962,-.

4.2 Pembahasan Umum

Dari paparan hasil di atas, diketahui bahwa proses produksi biodiesel mikroalga masih relatif mahal sehingga memerlukan pengembangan dan modifikasi pada beberapa hal seperti pemilihan bahan baku, perbaikan metode serta inovasi kreatif yang dapat meningkatkan nilai produk *biodiesel* tersebut.

Salah satu upaya misalnya dengan menekan penggunaan energi listrik dengan mengganti *pedal wheel* dengan kincir angin, menggunakan teknik pemanenan secara alami dengan pengendapan.

Pada tahap produksi lipid, prosesi pemecahan dinding sel diganti dengan metode yang lebih

efisien untuk dapat menggantikan proses pemecahan dinding sel secara fisik. Dari hasil perhitungan nilai NER menunjukkan nilai dibawah angka 1, hal ini berarti bahwa upaya produksi *biodiesel* dari mikroalga belum menguntungkan, banyaknya energi fosil yang digunakan tidak sebanding dengan *biodiesel* yang dihasilkan.

Tabel 2. Daftar Produk dan Biaya dari Produksi 1 liter *Biodiesel* Mikroalga

Produk/Manfaat/Biaya	Jumlah	MJ	Nilai (Rp)
Produk			42.900,0
a. Biomassa (serat)	4,44 kg	0,89 ¹²	2.200 ¹³
b. Jasa penyerapan emisi CO ₂	6 kg		11.700
c. Biodiesel	1 liter	44,2 ¹¹	9.800 ¹⁴
d. Jasa suplay gas O ₂	15 kg		12.500 ¹²
e. Gliserol	0,18 kg	15,2 ¹⁵	6.700 ¹⁶
Biaya			62.962,8
a. Budidaya			
KNO ₃	0,34 kg	0,26	156
P ₂ O ₅	0,18 kg	0,07	42
Energi listrik	55,6 MJ	55,60	33.360
b. Produksi minyak alga			
Energi listrik	35,7 MJ	35,70	21.420
Transportasi	0,05 tkm	0,013	7,8
c. Produksi <i>biodiesel</i>			
Metanol	0,21 kg	0,11	66
NaOH	0,01 kg	0,005	3
NaOCH ₃	0,03 kg	0,035	21
HCl	0,02 kg	0,132	79,2
Energi panas	2,06 MJ	4,24	2.544
Energi listrik	2,96 MJ	8,76	5.256
Transportasi	0,05 tkm	0,013	7,8

Rendahnya nilai NER ini mengindikasikan bahwa biomassa mikroalga masih belum efisien dan ekonomis bila dijadikan sebagai bahan baku *biodiesel*. Namun demikian, nilai NER dari produksi *biodiesel* mikroalga masih bisa ditingkatkan misalnya dengan upaya memperbaiki produktivitas biomassa mikroalga, mengefisienkan penggunaan energi listrik dan bahan bakar fosil, memanfaatkan limbah untuk proses produksi misalnya limbah metanol dapat diolah dan dipakai lagi dalam proses produksi.

Upaya lain untuk meningkatkan NER adalah menambah variasi produk samping seperti produksi gas, dan pemanfaatan limbah biomas untuk keperluan ekonomis yang lain. Dari tinjauan finansial juga menunjukkan bahwa biaya produksi *biodiesel* mikroalga masih lebih besar dibanding nilai produk dan manfaat yang diperoleh.

Perbandingan biaya produksi dan hasilnya adalah 1,5 : 1, artinya setiap produksi masih ada kerugian sebesar 50% dari modal yang dipakai, meskipun pada hasil produk sudah ditambahkan nilai manfaat berupa apresiasi akibat penyerapan emisi gas CO₂ dan suplai gas O₂ yang biasanya tidak dihitung di pasaran.

4. KESIMPULAN

Aplikasi LCA dapat memberi gambaran tentang inventarisasi *input*, *output* energi pada proses produksi *biodiesel* mikroalga dengan rinci dan jelas. Dari hasil analisa kesetimbangan energi, proses produksi *biodiesel* mikroalga masih belum efisien dan ekonomis. Energi yang digunakan banyak terserap pada kegiatan budidaya, pemanenan dan pemecahan dinding sel. Nilai hasil perhitungan NER relatif kecil yakni 0,62±0,78. Secara finansial, proses produksi

biodiesel mikroalga belum ekonomis. Total biaya produksi lebih besar dibanding pendapatan. Total biaya produksi dan total pendapatan adalah Rp. 62.980,- dan Rp. 42.900,-.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada Kementerian Riset dan Teknologi, atas bantuan pembiayaan penelitian ini. Penghargaan yang tinggi penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Tresna P. Soemardi, M.Eng., Prof. Dr. Kardono, M.Eng dan Dr. Awal Subandar, M.Sc atas bimbingan, arahan dan koreksi makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Boedoyo, M.S dan A. Sugiono, (2015), *Outlook Energi Indonesia 2015*, Pengembangan Energi untuk Mendukung Pembangunan Berkelanjutan. BPPT - Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi. 105 hal.
2. Mc.Kibbin, W.J., (2005), *Indonesia in a Changing Global Environment. The politics and Economics of Indonesia's Natural Resources. Institute of Southeast Asian Studies*, Singapore. 53-70 p.
3. Halim, R., B. Gladman, M.K., Danquah, P.A., Webley, (2011), Oil Extraction from Microalgae for Biodiesel Production, *Biores Technol*, 102: 178 – 185.
4. Demirbas, A., Demirbas, M.F., (2011), Importance of Algal Oil as a Source of Biodiesel, *Energy Convers Manage*, 52: 163 – 170.
5. Khoo, H.H., Tan, R.B.H., Tan, Z.H., (2009), GHG Intensities from the Life Cycle of Conventional Fuel and Biofuels, In: Brebbia, C.A., Popov, V. (Editors), *Air Pollution XVII*. WIT Press, UK, pp. 329- 340.
6. Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales E.A., Embiruçu M., Ghirardi M.L., (2010), Comparative Energy Life-Cycle Analyses of Microalgal Biomass Production in Open Ponds and Photobioreactors, *Bioresour Technol*, 101:1406–1413.
7. Scott, S.A., Davey, M.P., Dennis, J.S., Horst, I., Howe, C.J., Lea-Smith, D.J., Smith, A.G., (2010), Biodiesel from algae: Challenges and Prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 21: 227–286.
8. Chisti, Y., (2007), Biodiesel from Microalgae. *Biotechnol Adv*, 25:294–306.
9. Stephenson, A.L., Kazamia, E., Dennis, J.S., Howe, C.J., Scott, S.A., Smith, A.G., (2010), Life Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. *Energy Fuels*, 24: 4062–4077.
10. Murthy, G.S., (2010), Life Cycle Analysis of Algae Biodiesel. *Int J. Life Cycle Assess*, 15:704-714.
11. Khoo, H.H., Lim, T.Z., Tan, R.B.H., (2010). Food Waste Conversion Options in Singapore, Environmental Impacts Based on an LCA Perspective. *Sci Total Environ*, 408: 1367–1373.
12. Pleanjai S., Gheewala S.H., (2009), Full Chain Energy Analysis of Biodiesel Production from Palm Oil in Thailand. *Applied Energy*, 18: 209-214.
13. Pachauri N., (2006), Value-Added Utilization of Crude Glycerol from Biodiesel Production: A Survey of Current Research Activities. An ASABE Meeting Presentation Paper Number: 066223.
14. Hutapea, M., (2012), Direktur Bioenergi, Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi. <http://www.indonesiainancetoday.com/read/35907/Konsumsi-Biodiesel-Nasional-Diprediksi-Tidak-Capai-Target>. diunduh 24 November 2015 jam 17.00.
15. www.molbase.com, diunduh 20/02/2015
16. Silalertruksa, T., Bonnet, S., Gheewala, S.H., (2012), Life Cycle Costing and Externalities of Palm oil *Biodiesel* in Thailand. *J. Cleaner Production*, 28: 225-232